

УДК 621.51:532.556.4

**В.П. ГЕРАСИМЕНКО**, д-р техн. наук; проф. НАКУ «ХАИ», Харьков;  
**А.С. ТКАЧУК**, магистр НАКУ «ХАИ», Харьков;  
**А.А. ЯЦЫШИН**, магистр НАКУ «ХАИ», Харьков

## О ПОЛЯРАХ ПЛОСКИХ ДИФFUЗОРОВ

Рассмотрены основные режимы течения в дозвуковых плоских диффузорах. Предложено представлять характеристики диффузоров в форме поляра. Такая форма характеристики удобная для практического использования при формировании облика диффузора с оптимальными параметрами.

Розглянуто основні режими течії у дозвукових плоских дифузорах. Запропоновано подавати характеристики дифузорів у формі поляр. Така форма характеристик зручна для практичного використання у формуванні обрису дифузора з оптимальними параметрами.

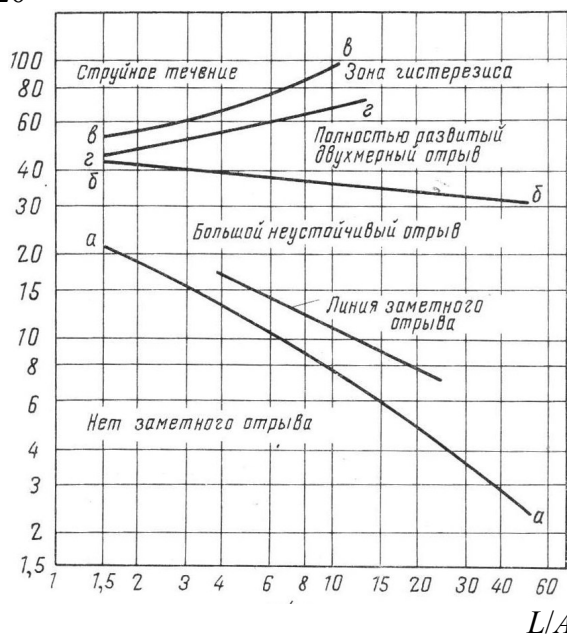
Fundamental air current regimes in subsonic straight-wall diffusers have been considered. Diffuser-polar characteristic curves are proposed. This characteristic shape is convenient for choice diffuser appearance with optimization parameters.

Диффузоры – простейшие преобразователи энергии в потоках газов, широко применяют в турбомашинах и энергетических установках [1–4]. Они должны обладать оптимальными качествами согласно их функциональному назначению в конкретных условиях применения, удовлетворяя при этом определенным требованиям-критериям оптимальности: иметь максимальное значение КПД или коэффициента повышения давления и т.п. Такие требования могут быть удовлетворены или путем специального выбора геометрических размеров под заданные условия течения, или путем выбора режима течения на характеристике диффузора с заданными геометрическими размерами. И в одном и в другом случаях указанные требования достигаются при безотрывном течении или при небольшом неустойчивом отрыве [5–7].

Развитие отрывных явлений в диффузорах имеет достаточно сложный характер в зависимости от типа диффузора: плоский прямолинейный или криволинейный, конический, кольцевой или осерадиальный и т.д. [8–12]. Картина отрыва потока даже в простейших плоских диффузорах с прямолинейными стенками имеет трехмерный характер и существенно отличается от классического отрыва внешних течений. Для внутренних течений в диффузорных каналах обнаружено четыре различных состояния по отрыву – четыре режима течения [13]: без заметного отрыва; с большим неустойчивым отрывом; с двумерным отрывом; со струйным течением. Перечисленным режимам течения соответствуют определенные области на обобщенных характеристиках плоских диффузоров (рис. 1), границы между которыми показаны примерно, ибо их положение может быть смещено малыми изменениями условий в потоке. Обобщенные характеристики плоских диффузоров (рис. 1) являются результатом подробных систематизированных расчетно-экспериментальных исследований дозвуковых диффузоров, выполненных по специальной программе в Стэндфордском университете (США) [6–11, 13]. Наряду с представленными характеристиками, где показаны области, соответствующие различным режимам течения, выделено три режима отрыва: неустойчивый отрыв; перемежающийся отрыв и начинающийся отрыв [11]. Получены также усовершенствованные корреляции отрыва [8, 13], положенные в основу определения границ срыва компрессорных ступеней [14, 15]. Практический интерес при создании диффузоров в технике представляют

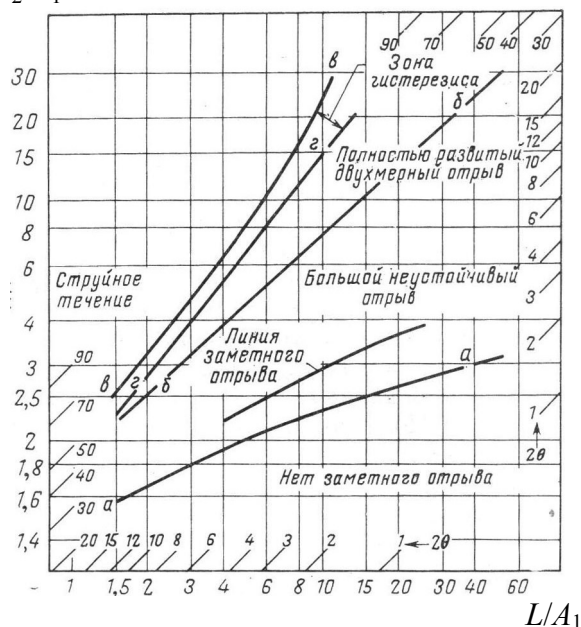
безотрывные режимы или при небольшом неустойчивом отрыве [2–7]. Поэтому определение характеристик диффузора при безотрывном течении – актуальная задача.

2θ



а)

$A_2/A_1$



б)

Рис. 1. Области режимов течения на характеристиках диффузоров

Целью данной статьи является разработка метода определения характеристик диффузоров с безотрывным течением. Такие характеристики удобны при использовании в форме поляр, связывающих коэффициент повышения давления

$C_p = \frac{P_2 - P_1}{\rho_1 W_1^2 / 2}$  и КПД  $\eta = C_p / C_{p_{ид}}$ , где  $C_{p_{ид}} = 1 - \frac{1}{(A_2/A_1)^2}$  – коэффициент идеального

повышения давления, с заданной геометрией диффузора. Установлено [9], что максимум КПД плоских диффузоров достигается при угле раскрытия  $2\theta \approx 7^\circ$ , а  $C_{p_{max}}$  – при несколько больших углах и наличии небольшого отрыва.

Анализ течения в плоских диффузорах позволяет достаточно наглядно описать основные закономерности их режимов работы. Безотрывные режимы течения или с неустойчивым перемежающимся отрывом [9] в простейших плоских диффузорах с прямолинейными стенками определяются, главным образом, общей геометрией диффузора с тремя безразмерными параметрами: углом раствора диффузора  $2\theta$ ; отношением площадей выхода и входа  $A_2/A_1$  и относительной длиной  $L/A_1$ , среди которых два из них являются независимыми, а третий – зависимый по формуле:

$$\frac{A_2}{A_1} - 1 = 2 \left( \frac{L}{A_1} \right) \operatorname{tg} \theta. \quad (1)$$

Наличие двух независимых переменных для плоских диффузоров, в пространстве которых удобно представлять их характеристики по режимам течения (рис. 1), определяется физической природой развития течения с возникновением отрывных явлений в пристенных пограничных слоях. А именно: нарастание пограничного слоя и его отрыв может происходить как за счет роста градиента давления при увеличении угла раскрытия диффузора, так и за счет утолщения

пограничного слоя на стенке при увеличении длины. В практической ситуации оба эффекта проявляются одновременно. В связи с этим при пояснении причин и механизмов основных гидравлических потерь в таких диффузорах обычно называют [2, 3]: потери, обусловленные расширением канала – диффузорностью; потери на трение об ограничивающие стенки, а также потери с выходной скоростью из диффузора. Дополнительным источником потерь, кроме названных, может быть загромождение проходного сечения на входе в диффузор пограничным слоем в виде параметра [9]  $2\delta_1^*/A_1$ , где  $\delta_1^*$  – толщина вытеснения пограничного слоя на боковой стенке на входе в диффузор. При сравнительно тонком пограничном слое на входе  $2\delta_1^*/A_1 \leq 0,012$  таким загромождением можно пренебречь, что соответствует условию не смыкания пограничных слоев на противоположных стенках и существованию однородного одномерного потенциального ядра основного потока вне пограничного слоя, оказывающего влияние на этот слой на стенках. Предположение о существовании равномерного потенциального ядра используют [5–9] при разработке методов расчета характеристик диффузоров, построенных на двухслойном подходе модели Л. Прандтля о вязко-невязкостном взаимодействии. Когда ядро потока рассматривают как течение идеальной жидкости без проявления вязкости, а течение в пограничных слоях на ограничивающих стенках учитывают с помощью интегральных параметров пограничного слоя на основе закона сохранения импульсов. Уравнение, связывающее местную скорость в одномерном ядре потока и толщину вытеснения пограничного слоя на стенке с заданными условиями на входе, получают для установившегося течения в виде уравнения сохранения суммарного массового расхода через любое поперечное сечение диффузора [13]. Такой подход, в общем, обеспечивает удовлетворительную точность расчета характеристик плоских диффузоров [9]. Однако применение его для расчета характеристик конических и осерадиальных кольцевых диффузоров не представляется возможным из-за отсутствия интегральных соотношений трехмерного пограничного слоя. Вместе с тем, даже для плоских диффузоров теория пограничного слоя, позволяющая определять касательные напряжения на поверхности стенок, справедлива только для безотрывного течения, поэтому существуют трудности в расчете сопротивления движению при отрыве потока. Более того, для турбулентных течений при больших автомодельных числах  $Re$ , строго говоря, уравнения Навье-Стокса не представляют собой замкнутую систему, а поэтому требуются дополнительные предположения [4], основанные часто на квалификации исследователя или экспериментах. В этой связи целесообразен поиск путей упрощенного описания характеристик диффузоров с достаточной точностью для выбора оптимальных геометрических размеров.

Двухзонный подход в расчете характеристик плоских диффузоров оказывается приемлемым при толстых турбулентных пограничных слоях на противоположных стенках диффузора, так как турбулентные профили скорости выравниваются на внешней границе пограничного слоя и потери полного давления вдоль этой границы обычно незначительны. С другой стороны при толстых пограничных слоях на входе в диффузор параметр  $2\delta_1^*/A_1$  может быть рассмотрен как дополнительная переменная [5, 13]. Подобная ситуация имеет практическое значение в случае расположения диффузора за длинным трубопроводом или иным устройством, а также для кольцевых диффузоров в системе турбомашин. Для однозначности описания режимов течения необходимо соблюдать также критерии гидродинамического подобия [5] по числам Рейнольдса и Маха или исключать их влияние в области автомодельности. Числа

Рейнольдса должны находиться в диапазоне  $Re = W_1 A_1 / \nu > 6 \cdot 10^3$ , а числа Маха для несжимаемой жидкости должны соответствовать дозвуковому течению, что при  $M_{w1} < 0,7 \dots 0,8$  с учетом уменьшения его вдоль диффузора практически не оказывает влияния на режим течения [5].

Таким образом, при соблюдении гидродинамического подобия и условий на входе характеристики простейших плоских безотрывных диффузоров однозначно определяется их геометрическими параметрами:  $2\theta$ ,  $A_2/A_1$ ,  $L/A_1$ . Подтверждением данного утверждения являются результаты расчетов характеристик плоских безотрывных диффузоров по двухзонной модели потока, состоящего из ядра невязкой жидкости и пограничных слоев на ограничивающих стенках диффузора [13]. Удовлетворительное совпадение результатов расчета с экспериментальными данными свидетельствует об однозначном соответствии изменения параметров в невязком ядре жидкости в диффузоре с заданными геометрическими параметрами  $2\theta$ ,  $A_2/A_1$ ,  $L/A_1$  согласно уравнениям Бернулли и массового расхода, а также формированию турбулентного пограничного слоя на боковых стенках диффузора с соответствующими его интегральными характеристиками на основе законов сохранения импульсов и массы. Следовательно определенным геометрическим параметрам плоского дозвукового безотрывного диффузора должны соответствовать аэродинамические параметры:  $C_p$  и  $\eta$  диффузора. Наличие такого соответствия свидетельствует о возможности представления характеристики диффузора в форме поляры – связи  $C_p$ , КПД или потерь с геометрическими параметрами. Поляра диффузора позволяет выбирать оптимальные его геометрические параметры на стадии формирования облика при проектировании или согласовании характеристик с другими примыкающими к нему элементами конструкции, т.е. решать обратную аэродинамическую задачу в отличие от решения прямой задачи, для которой требуются трудоемкие вычислительные комплексы [4], или приходится решать задачу о вязко-невязком взаимодействии.

Связь коэффициента повышения давления  $C_p$  с КПД диффузора  $\eta = C_p/C_{p_{ид}}$  или коэффициентом потерь полного давления  $\xi = \frac{P_1^* - P_2^2}{\rho_1 W_1^2 / 2}$  вытекает из уравнения Бернулли:

$$C_p = 1 - \frac{W_2^2}{W_1^2} - \xi, \quad (2)$$

где, согласно уравнению расхода для несжимаемой жидкости, первые два слагаемых правой части представляют собой  $C_{p_{ид}}$  – идеальный коэффициент повышения давления

$$C_{p_{ид}} = 1 - \frac{W_2^2}{W_1^2} = 1 - \frac{1}{(A_2/A_1)^2}, \quad (3)$$

откуда

$$\xi = (1 - \eta) C_{p_{ид}}. \quad (4)$$

Зависимости коэффициентов  $C_p$  и  $\eta$  от геометрических параметров диффузоров достаточно наглядно представлены на рис. 2, где правая нижняя часть рисунков соответствует безотрывным режимам течения при небольших углах раствора диффузоров  $2\theta < 8^\circ$ . Из рис. 2а видно, что в этой части линии  $C_p = \text{const}$  изображаются примерно горизонталями  $A_2/A_1 = \text{const}$  согласно соотношению (3). С ростом  $A_2/A_1$  и угла  $2\theta$  увеличение  $C_p$  происходит вплоть до линии  $C_{p_{\max}}$ , которая достигается примерно

при значении угла раствора диффузора  $2\theta \approx 8^\circ$ . Дальнейший рост угла раствора диффузора приводит к понижению  $C_p$  вследствие развития отрыва потока. Аналогичные изменения наблюдаются и с значениями КПД на рис. 2б при росте угла раствора диффузора, соответствующему перемещению по диагонали рис. 2б из правого нижнего угла в направлении к левому верхнему углу, где в начале наблюдается рост КПД, а после достижения  $\eta_{\max}$  при угле  $2\theta \approx 7^\circ$  – понижение. Таким образом, из рис. 2а, б видно, что направление роста угла раствора  $2\theta$  соответствует градиентам коэффициентов повышения давления и КПД.

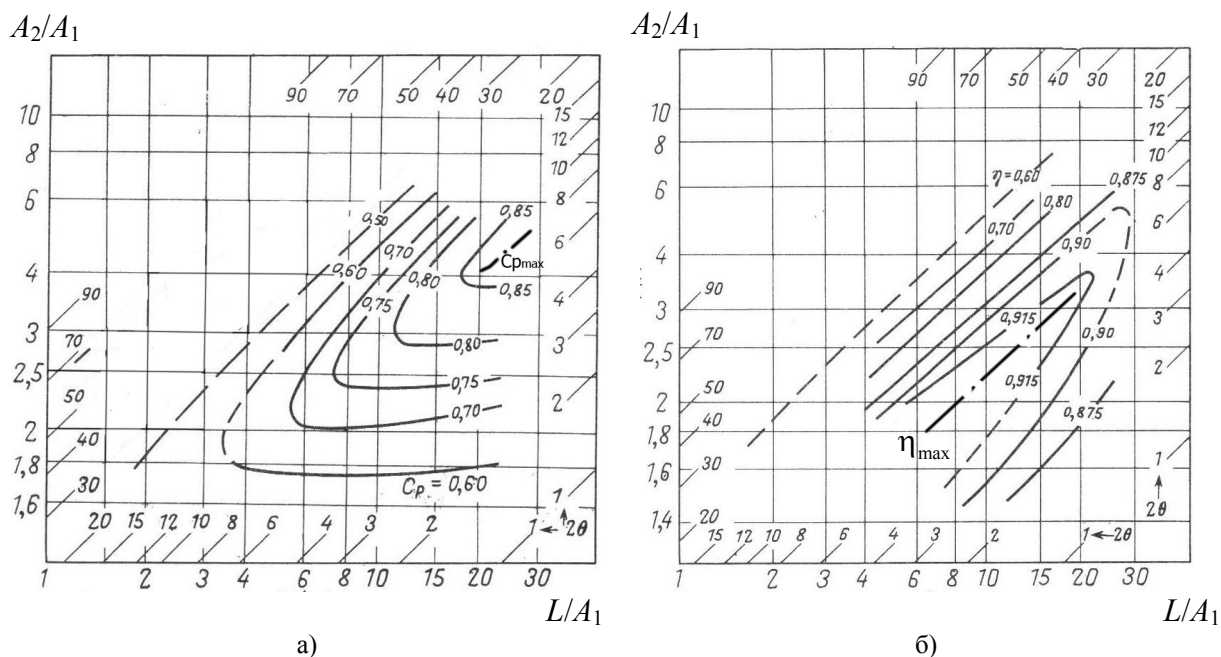


Рис. 2. Топограммы коэффициента повышения давления (а) и коэффициента полезного действия (б) плоских дозвуковых диффузоров

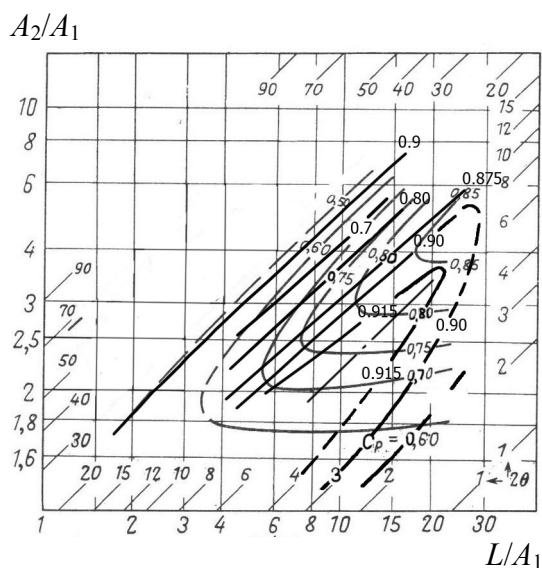


Рис. 3. Поляра диффузоров

Совмещение этих двух рисунков путем их наложения друг на друга позволяет установить связь коэффициентов  $C_p$  и  $\eta$  в пространстве геометрических параметров:  $2\theta$ ,  $A_2/A_1$ ,  $L/A_1$ , что соответствует поляре диффузора (рис. 3). Ввиду того, что линия, соответствующая максимальному КПД на рис. 2б, достигается при угле раствора диффузора  $2\theta \approx 7^\circ$ , то нанесение данной линии на рис. 2а позволяет определить геометрические размеры диффузора  $2\theta$ ,  $A_2/A_1$ ,  $L/A_1$  и коэффициент повышения давления  $C_p$  при  $\eta_{\max}$ . Аналогично поляра диффузоров (см. рис. 3) позволяет определить сочетание геометрических параметров плоского диффузора с необходимыми значениями коэффициента повышения давления  $C_p$  и

КПД. Такая информация важна на стадии проектирования диффузора при формировании его облика. Следует также отметить, что изолинии КПД, представленные на рис. 2б, могут быть получены с помощью рис. 2а, если иметь ввиду

связи параметров  $C_p$ ,  $\eta$ ,  $A_2/A_1$ :  $\eta = \frac{C_p}{1 - \frac{1}{(A_2/A_1)^2}}$ , где отношение площадей ( $A_2/A_1$ ),

записанное в знаменателе правой части формулы, представляет собой ось ординат на графике рис. 2а. А поэтому пересечение линий  $C_p = \text{const}$  и  $\eta = \text{const}$  на рис. 3 происходит по горизонталям, т.е. при  $A_2/A_1 = \text{const}$ . Таким образом, изложен графо-аналитический метод построения плоских диффузоров на основе поляр.

**Список литературы:** 1. Greitzer, E.M. Coupled compressor diffuser flow in stability [Text] / E.M. Greitzer // Journal of aircraft. – 1977. – Vol. 14, № 3. – P. 233-238. 2. Герасименко, В.П. Параметрический анализ характеристик кольцевого диффузора [Текст] / В.П. Герасименко, Е.В. Осипов // Авиационно-космическая техника и технология. Научно-технический журнал. – Х.: ХАИ. – 2008. – № 6(53). – С. 84-89. 3. Юдин, А.Ю. Исследование осесимметричных диффузоров выхлопных патрубков турбомашин со специальным вдувом потока [Текст] / А.Ю. Юдин // Авиационно-космическая техника и технология. Научно-технический журнал. – Х.: ХАИ. – 2011. – № 3(80). – С. 80-84. 4. Русанов, А.В. Аэродинамическое совершенствование проточной части турбины ГТД на основе расчетов трехмерного вязкого течения. Часть 2. Переходной диффузор и ступень силовой турбины [Текст] / А.В. Русанов, С.В. Ершов, Б.В. Исаков [и др.] // Авиационно-космическая техника и технология. Научно-технический журнал. – Х.: ХАИ. – 2004. – № 8(16). – С. 46-50. 5. Биндер. Разработка и применение метода расчета рабочей характеристики прямолинейных прямоугольных диффузоров [Текст] / Биндер, Аль-Моффар // Тр. америк. общ. инж.-мех. Сер. Энергетические машины и установки. – 1983. – № 1. – С. 84-88. 6. Строн. Метод расчета плоских и осесимметричных диффузоров, основанный на определении запаса по отрыву [Текст] / Строн, Клайн // Тр. америк. общ. инж.-мех. Сер. Теоретические основы инженерных расчетов. – 1983. – № 1. – С. 115-121. 7. Гоуз. Расчет максимального восстановления давления в плоских диффузорах [Текст] / Гоуз, Клайн // Тр. америк. общ. инж.-мех. Сер. Теоретические основы инженерных расчетов. – 1978. – № 4. – С. 130-138. 8. Бардина. Метод расчета течения в плоских диффузорах [Текст] / Бардина, Лирно, Клайн, Ферзигер, Джонстон // Тр. америк. общ. инж.-мех. Сер. Теоретические основы инженерных расчетов. – 1981. – № 2. – С. 260-267. 9. Рено. Характеристики и расчет плоских диффузоров с прямолинейной осью [Текст] / Рено, Джонстон, Клайн // Тр. америк. общ. инж.-мех. Сер. Теоретические основы инженерных расчетов. – 1967. – № 1. – С. 160-172. 10. Фокс. Режимы течения в криволинейных дозвуковых диффузорах [Текст] / Фокс, Клайн // Техническая механика. – 1962. – № 3. – С. 3-11. 11. Энджаи. Неустойчивый отрыв потока и максимальное восстановление давления в двумерных диффузорах с прямолинейными стенками [Текст] / Энджаи, Джонстон // Тр. америк. общ. инж.-мех. Сер. Теоретические основы инженерных расчетов. – 1980. – № 3. – С. 97-104. 12. Лохманн. Закрученное течение в кольцевых диффузорах с коническими стенками [Текст] / Лохманн, Марковски, Брукман // Тр. америк. общ. инж.-мех. Сер. Теоретические основы инженерных расчетов. – 1979. – № 2. – С. 143-149. 13. Рено. Метод определения характеристик плоских безотрывных диффузоров [Текст] / Рено, Джонстон // Тр. америк. общ. инж.-мех. Сер. Теоретические основы инженерных расчетов. – 1967. – № 3. – С. 216-230. 14. Zika, V.J. Correlation and prediction of rotating stall inception by divergence method [Text] / V.J. Zika // Trans. ASME. Journal of Fluid Engineering. – 1985. – Vol. 107, N 2. – P. 191-196. 15. Титенский, В.И. Обобщение опытных данных о границе помпажа ступени осевого компрессора [Текст] / В.И. Титенский // Труды ЦКТИ. – 1970. – Вып. 102. – С. 76-85.

© Герасименко В.П., Ткачук А.С., Яцышин А.А., 2012

Поступила в редколлегию 15.02.12